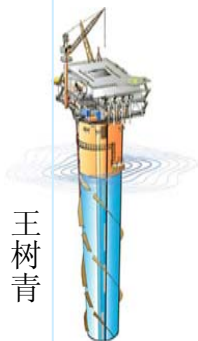


海洋工程波浪力学

中国海洋大学工程学院海洋工程系
王树青

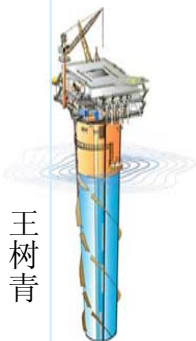


目 录

- 第一章 液体表面波基本方程
- 第二章 小振幅波（线性波）理论
- 第三章 有限振幅波（非线性波）理论
- 第四章 小尺度结构上的波浪力
- 第五章 大尺度结构上的波浪力
- 第六章 随机波浪和随机波浪力

第五章 大尺度结构上的波浪力

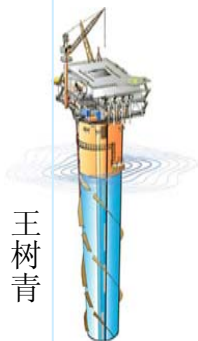
- **5.1** 线性绕射问题
- **5.2** 大直径直立圆柱上的波浪力
 - **5.2.1 MacCamy-Fuchs**公式
 - **5.2.2** 大直径直立圆柱上的非线性波浪力
- **5.3** 任意形状大尺度结构物上的波浪力
 - **5.3.1** 三维源分布法
 - **5.3.2** 有限元法
- **5.4** 大尺度潜体上的波浪力



简介

❖ 波浪对固定海洋结构物的作用主要是以下四种效应：

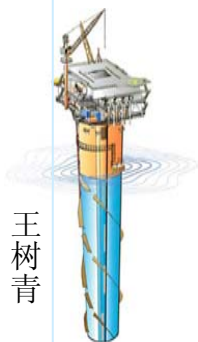
- (1) 由于流体的粘滞性而引起的粘滞效应；
- (2) 由于流体的惯性以及结构物的存在，使结构物周围的波动场的速度发生改变而引起的附加质量效应；
- (3) 由于结构物本身对入射波的绕射作用而产生的绕射效应；
- (4) 由于结构物本身的相对高度较大，结构物与自由表面接近扰动了原波动场的自由表面而产生的自由表面效应。



简介

❖ 波浪力的计算按照其尺度大小的不同:

- (1) 与入射波相比, 尺度较小的结构物, 例如孤立桩柱、水下输油管道等, 此类结构物的存在对波浪运动无显著影响, 波浪对结构物的作用主要为粘滞效应和附加质量效应;
- (2) 而随着结构物尺度相对于波长比值的增大, 例如平台的大型基础沉垫、大型石油贮罐等, 此类尺度较大的结构物本身的存在对波浪运动有显著影响, 对入射波浪的绕射效应以及自由表面效应必须考虑。此时要采用绕射理论 (MacCamy和Fucks) 计算波浪力;



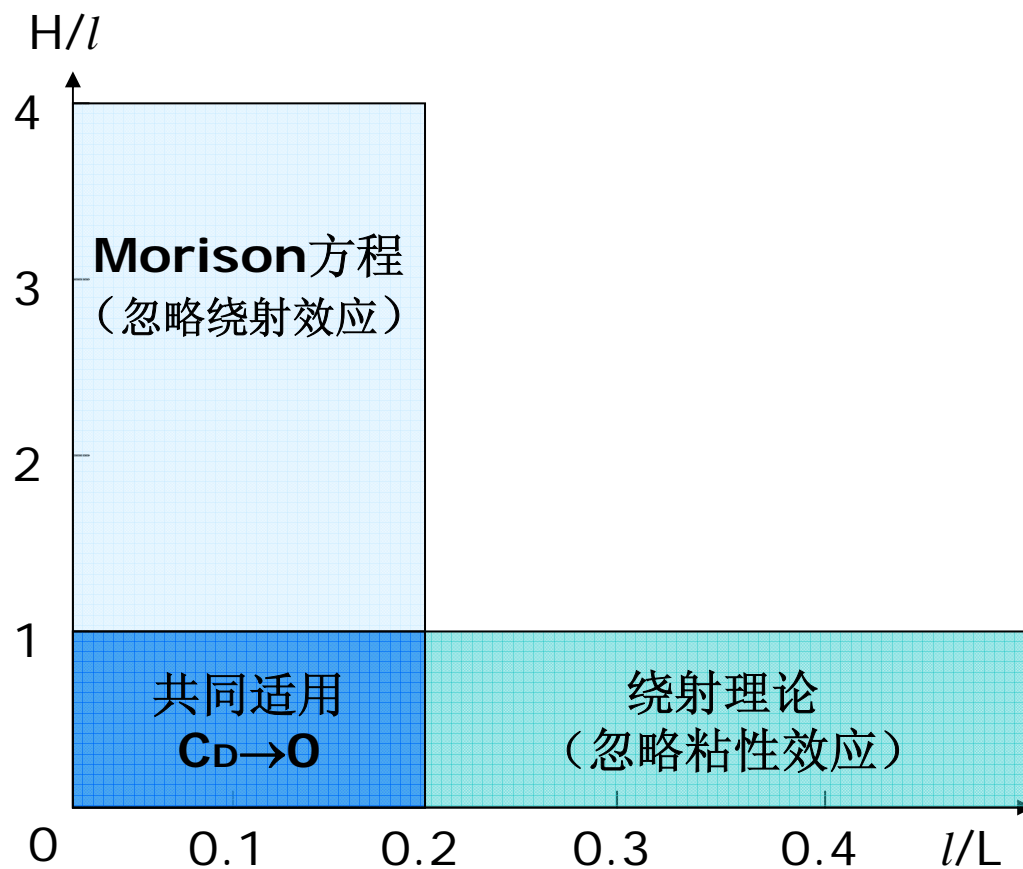
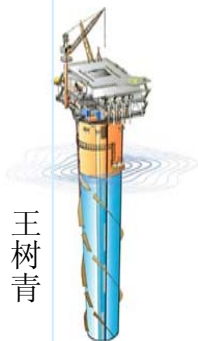
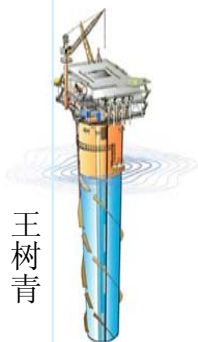


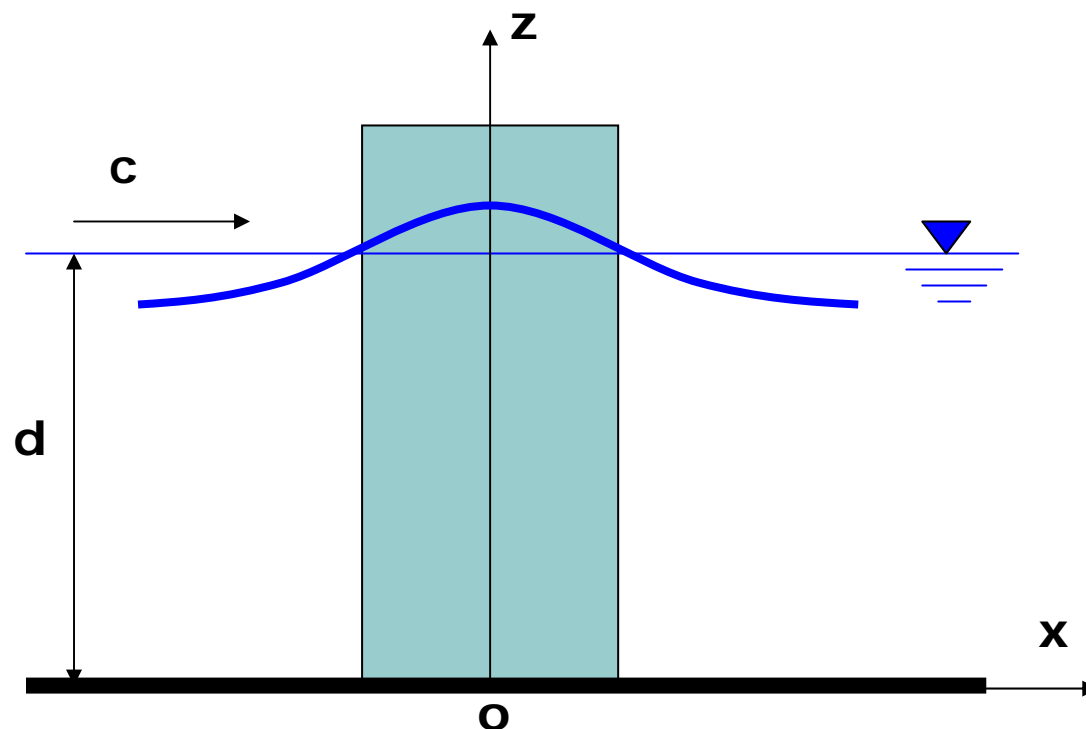
图5.1 两种计算波浪力方法的适用范围



5.1 线性绕射问题

❖ 线性绕射问题

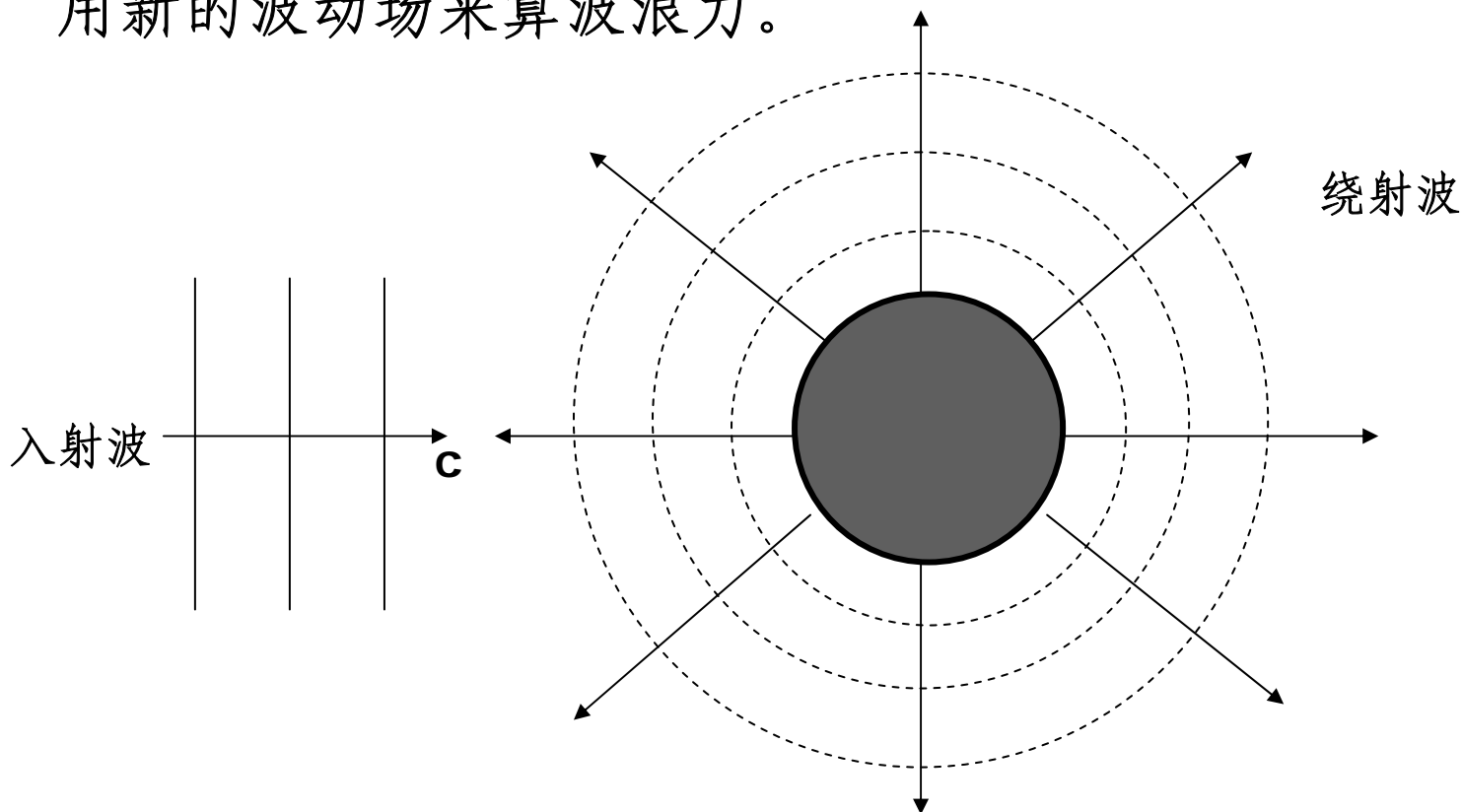
假定流体是不可压缩的理想流体流体，运动时有势的。如果入射波为波高很小的线性波，并且认为波浪与结构物的相互作用是线性的，此时的绕射问题为线性绕射问题。

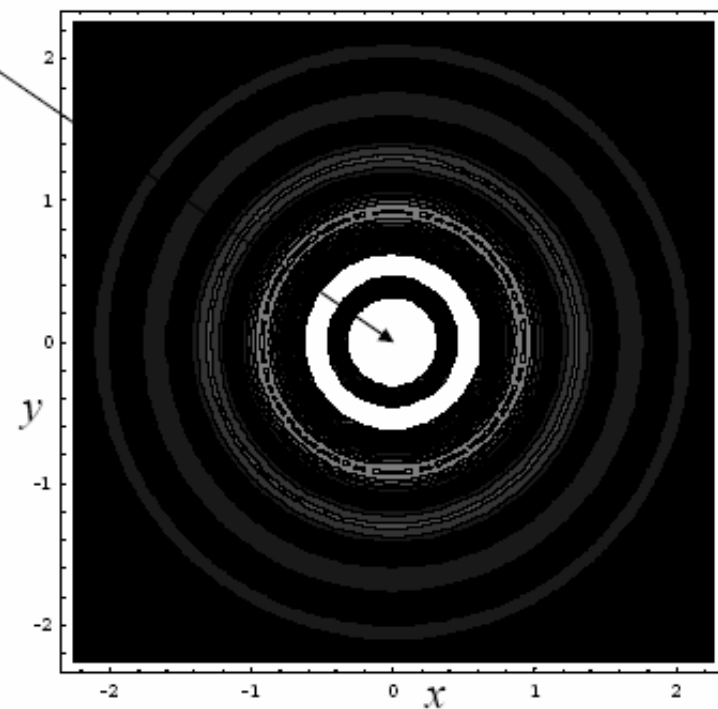
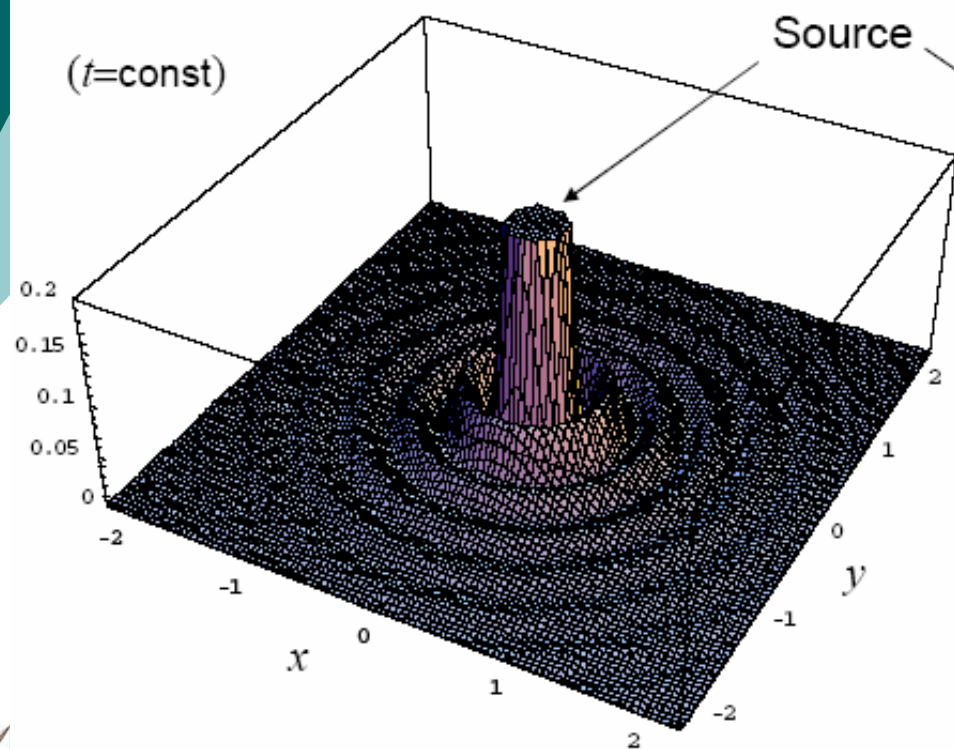
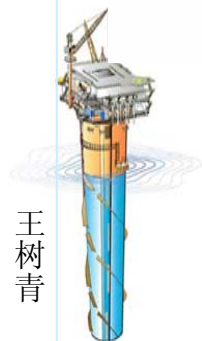


5.1 线性绕射问题

❖ 基本思路

- 当波向前传播遇到结构物后，在结构物的表面将产生一个散射的波，入射波与散射波的叠加达到稳态时，将形成一个新的波动场。得到新的波动场的特征值后，用新的波动场来算波浪力。





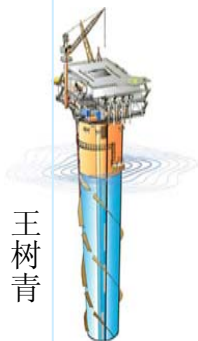
5.1.1 线性绕射问题的基本方程和边界条件

❖ 总速度势由两部分组成

- 入射波速度势:
- 散射波速度势:

$$\Phi(x, y, z, t) = \Phi_I(x, y, z, t) + \Phi_s(x, y, z, t)$$

$$\begin{aligned}\Phi(x, y, z, t) &= \phi(x, y, z)e^{-i\omega t} \\ &= [\phi_I(x, y, z) + \phi_s(x, y, z)]e^{-i\omega t}\end{aligned}$$



5.1.1 线性绕射问题的基本方程和边界条件

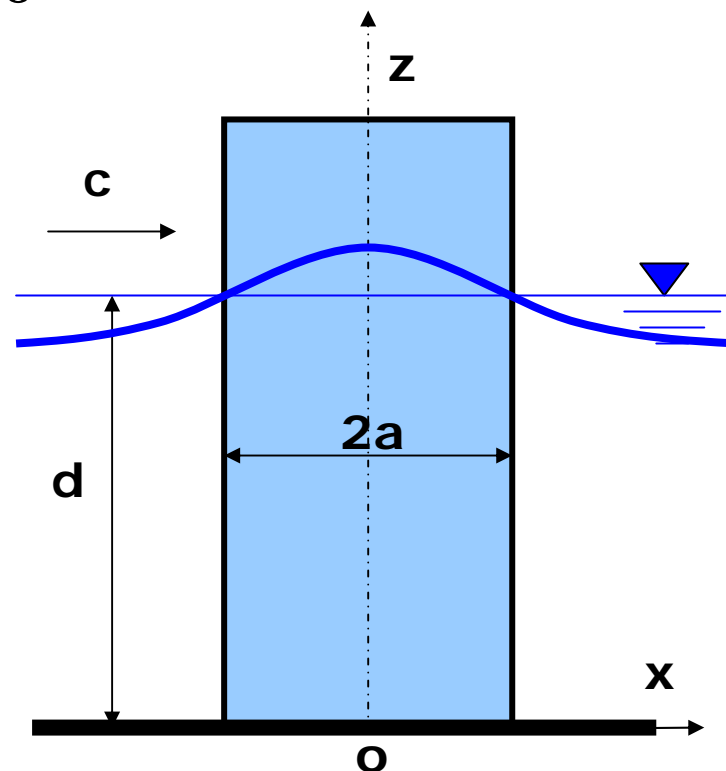
❖ 总速度势

a. 拉普拉斯方程: $\nabla^2 \phi = 0$

b. 自由水面 $z=0$: $\frac{\partial \phi}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g} \phi = 0$

c. 水底条件 $z = -d$ $\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0$

d. 物面条件 $S(x, y, z) = 0$ $\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$



5.1.1 线性绕射问题的基本方程和边界条件

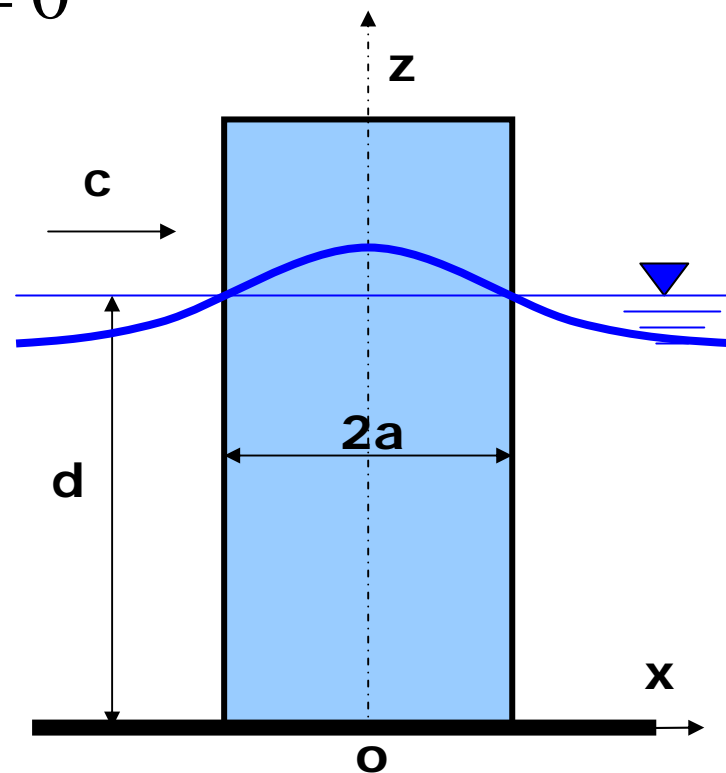
❖ 入射波速度势

a. 拉普拉斯方程: $\nabla^2 \phi_I = 0$

b. 自由水面 $z=0$: $\frac{\partial \phi_I}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g} \phi_I = 0$

c. 水底条件 $z=-d$ $\frac{\partial \phi_I}{\partial z} = 0$

$$\phi_I = -i \frac{gH}{2\omega} \frac{ch kz}{ch kd} e^{ikx}$$



○ 5.1.1 线性绕射问题的基本方程和边界条件

❖ 散射波速度势

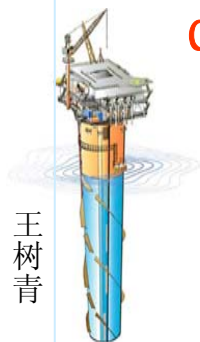
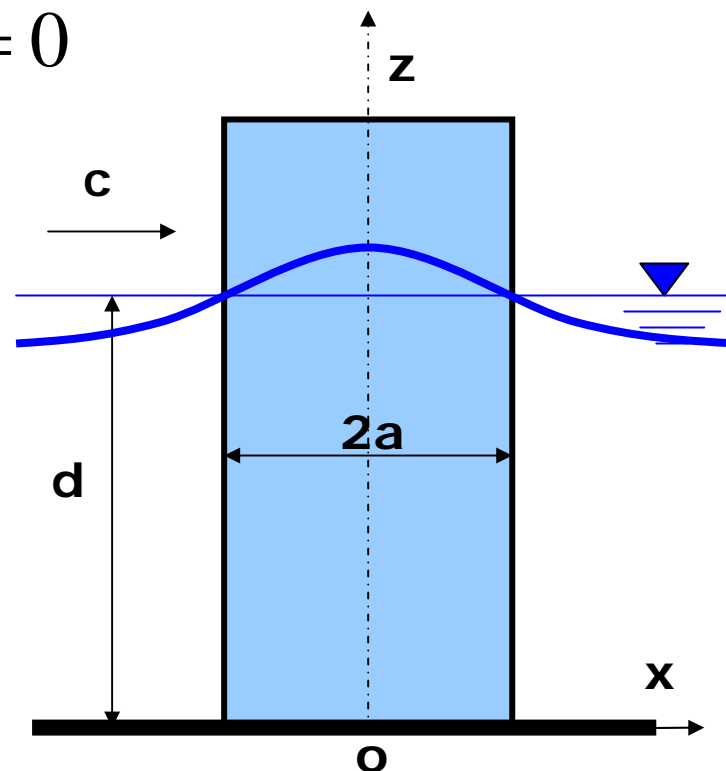
a. 拉普拉斯方程: $\nabla^2 \phi_s = 0$

b. 自由水面 $z=0$: $\frac{\partial \phi_s}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g} \phi_s = 0$

c. 水底条件 $z=-d$ $\frac{\partial \phi_s}{\partial z} = 0$

d. 物面条件 $S(x, y, z) = 0$

$$\frac{\partial \phi_s}{\partial n} = -\frac{\partial \phi_I}{\partial n}$$

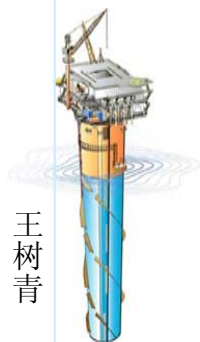


5.1.1 线性绕射问题的基本方程和边界条件

- 求解得到以复数形式表示的绕射波速度势;
- 将其与已知的入射波速度势线性迭加, 可得到扰动后波动场内任一点总速度势。
- 应用线性化的伯努利方程便可得到结构物表面上的波压强分布。
- 若不计静压强 $\rho g z$, 则结构物表面上各点的波压强为:

$$\Phi(x, y, z, t) = \phi(x, y, z)e^{-i\omega t}$$

$$\begin{aligned} p &= -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \rho \omega \operatorname{Re} \left[i \phi(x, y, z) e^{-i\omega t} \right] \\ &= \rho \omega \operatorname{Re} \left[i (\phi_I + \phi_S) e^{-i\omega t} \right] \end{aligned}$$

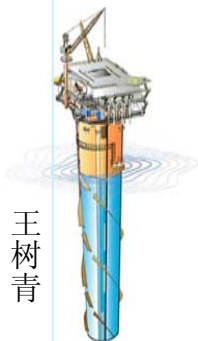


○ 5.1.1 线性绕射问题的基本方程和边界条件

□ 波浪力F和波浪力矩M

$$F = \iint_S -p \cdot n ds = -\rho\omega \iint_S \operatorname{Re}[i\phi e^{-i\omega t}] n ds$$

$$M = \iint_S -p \cdot (r \times n) ds = -\rho\omega \iint_S \operatorname{Re}[i\phi e^{-i\omega t}] (r \times n) ds$$



○ 5.1.2 绕射系数和质量系数

□ 波浪对结构的作用力表示成

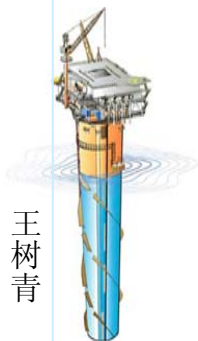
$$F = F_K + F_d$$

- F_K ——未扰动入射波波压强对结构产生的Froude-Krylov力（简称F-K力）
- F_d ——扰动波波压强对结构产生的扰动力，与附加质量效应和绕射效应有关（绕射力）

□ Froude-Krylov假定：

$$F = CF_K \quad C = \frac{F}{F_K} = \frac{F_K + F_d}{F_K}$$

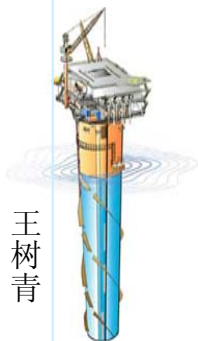
- C ——绕射系数



○ 5.1.2 绕射系数和质量系数

□ 对尺度较小 ($D/L < 0.2$) 结构物, 忽略绕射效应,

$$C = \frac{F_K + F_d}{F_K} = \frac{\rho V \frac{du}{dt} + C_m \rho V \frac{du}{dt}}{\rho V \frac{du}{dt}} = 1 + C_m = C_M$$

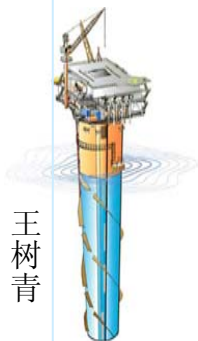
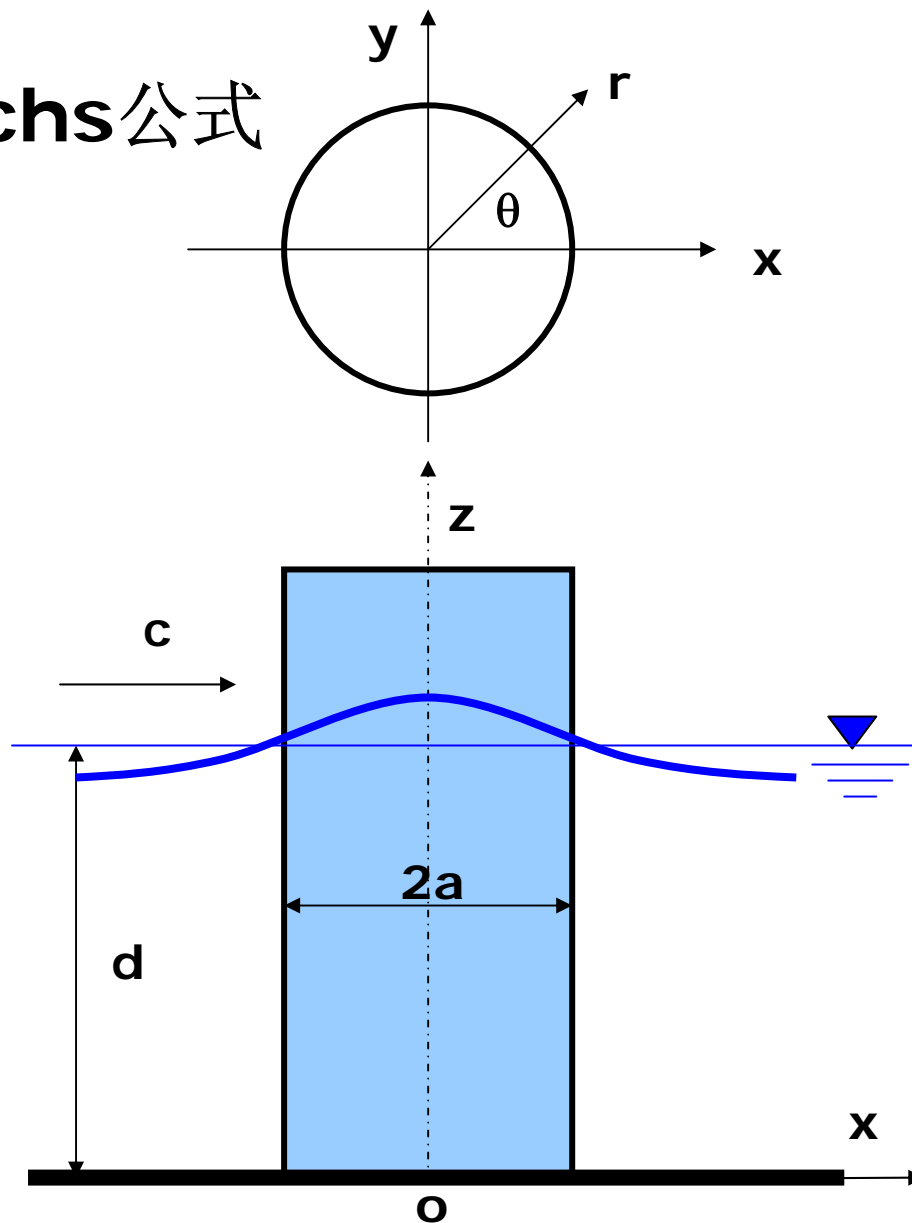


5.2 大直径直立圆柱上的波浪力

5.2.1 MacCamy-Fuchs公式

基本思路：

将波浪力分解为绕射力和入射力，在理想、无旋、有势的假定下，利用Laplace方程，在图所示柱坐标系下，求解散射波；



5.2.1 MacCamy-Fuchs公式

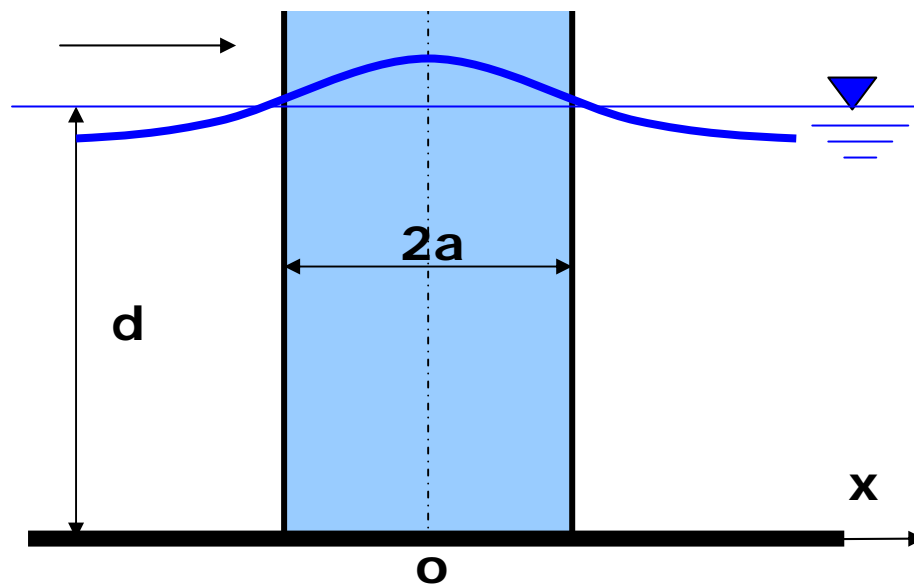
❖ 入射波速度势

$$\Phi_I = -i \frac{gH}{2\omega} \frac{chkz}{chkd} e^{i(kx - \omega t)}$$

❖ 柱坐标系速度势

$$e^{ikx} = e^{ikr\cos\theta} = \cos(kr\cos\theta) + i\sin(kr\cos\theta)$$

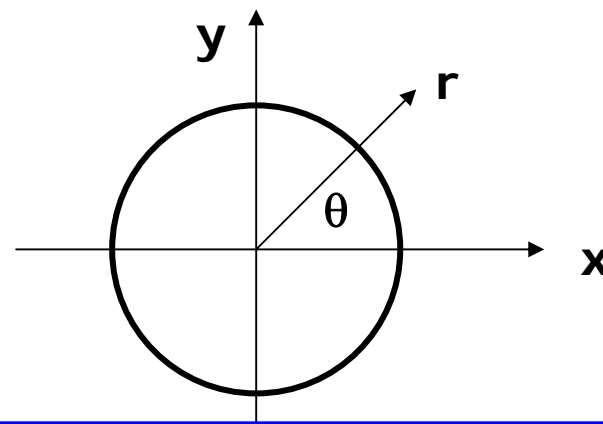
$$\Phi_I = -i \frac{gH}{2\omega} \frac{chkz}{chkd} \left[\sum_{m=0}^{\infty} \beta_m J_m(kr) \cos(m\theta) \right] e^{-i\omega t}$$



5.2.1 MacCamy-Fuchs公式

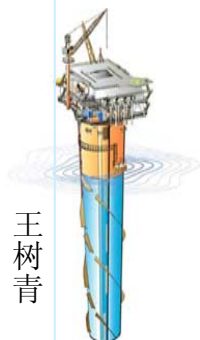
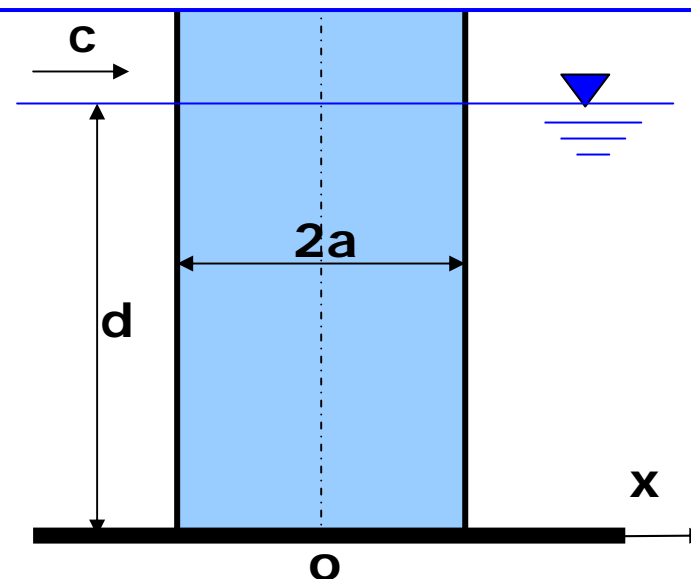
❖ 散射波速度势

$$\frac{\partial^2 \phi_s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi_s}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi_s}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \phi_s}{\partial z^2} = 0$$



$$\Phi_s = -i \frac{gH}{2\omega} \frac{chkz}{chkd} \left[\sum_{m=0}^{\infty} \beta_m B_m H_m(kr) \cos(m\theta) \right] e^{-i\omega t}$$

$$H_m(kr) = J_m(kr) + iY_m(kr)$$



5.2.1 MacCamy-Fuchs公式

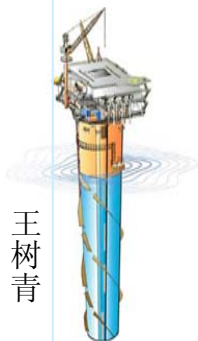
❖ 总速度势

$$\Phi_I = -i \frac{gH}{2\omega} \frac{chkz}{chkd} \left[\sum_{m=0}^{\infty} \beta_m J_m(kr) \cos(m\theta) \right] e^{-i\omega t}$$

$$\Phi_s = -i \frac{gH}{2\omega} \frac{chkz}{chkd} \left[\sum_{m=0}^{\infty} \beta_m B_m H_m(kr) \cos(m\theta) \right] e^{-i\omega t}$$

$$\Phi(x, y, z, t) = \Phi_I(x, y, z, t) + \Phi_s(x, y, z, t)$$

$$\Phi = -i \frac{gH}{2\omega} \frac{chkz}{chkd} \left[\sum_{m=0}^{\infty} \beta_m J_m(kr) \cos(m\theta) + \sum_{m=0}^{\infty} \beta_m B_m H_m(kr) \cos(m\theta) \right] e^{-i\omega t}$$



5.2.1 MacCamy-Fuchs公式

❖ 总速度势

$$\Phi = -i \frac{gH}{2\omega} \frac{chkz}{chkd} \left[\sum_{m=0}^{\infty} \beta_m J_m(kr) \cos(m\theta) + \sum_{m=0}^{\infty} \beta_m B_m H_m(kr) \cos(m\theta) \right] e^{-i\omega t}$$

- 确定系数 B_m ——柱面边界条件

$$U_r|_{r=a} = \frac{\partial \Phi}{\partial r} \bigg|_{r=a} = \left(\frac{\partial \Phi_I}{\partial r} + \frac{\partial \Phi_S}{\partial r} \right) \bigg|_{r=a} = 0 \quad \longrightarrow \quad B_m = -\frac{J'_m(ka)}{H'_m(ka)}$$

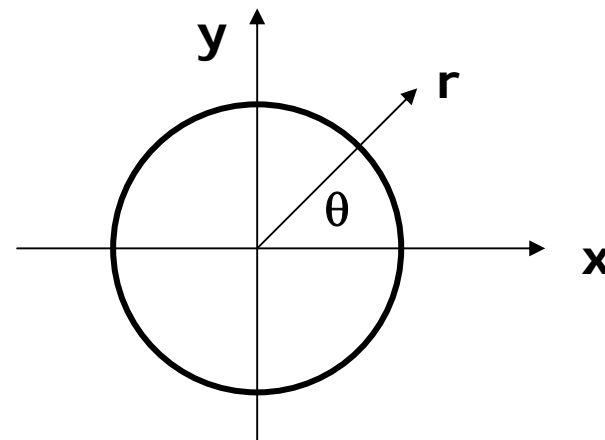
$$\Phi = -i \frac{gH}{2\omega} \frac{chkz}{chkd} \left\{ \sum_{m=0}^{\infty} \beta_m \left[J_m(kr) - \frac{J'_m(ka)}{H'_m(ka)} H_m(kr) \right] \cos(m\theta) \right\} e^{-i\omega t}$$



5.2.1 MacCamy-Fuchs公式

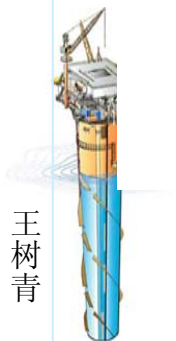
❖ 柱面压强

$$p = -\rho \left. \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right|_{r=a}$$



$$= \frac{\rho g H}{2} \frac{ch k z}{ch k d} \left\{ \sum_{m=0}^{\infty} \beta_m \left[J_m(ka) - \frac{J'_m(ka)}{H'_m(ka)} H_m(ka) \right] \cos(m\theta) \right\} e^{-i\omega t}$$

$$= \frac{\rho g H}{2} \frac{ch k z}{ch k d} \left\{ [A_{0a} + 2 \sum_{m=0}^{\infty} (-1)^m ([A_{2ma} \cos 2m\theta + A_{(2m-1)b} \cos(2m-1)\theta)] \cos \omega t \right. \\ \left. + [A_{0b} + 2 \sum_{m=0}^{\infty} (-1)^m ([A_{2mb} \cos 2m\theta - A_{(2m-1)a} \cos(2m-1)\theta)] \sin \omega t \right\}$$

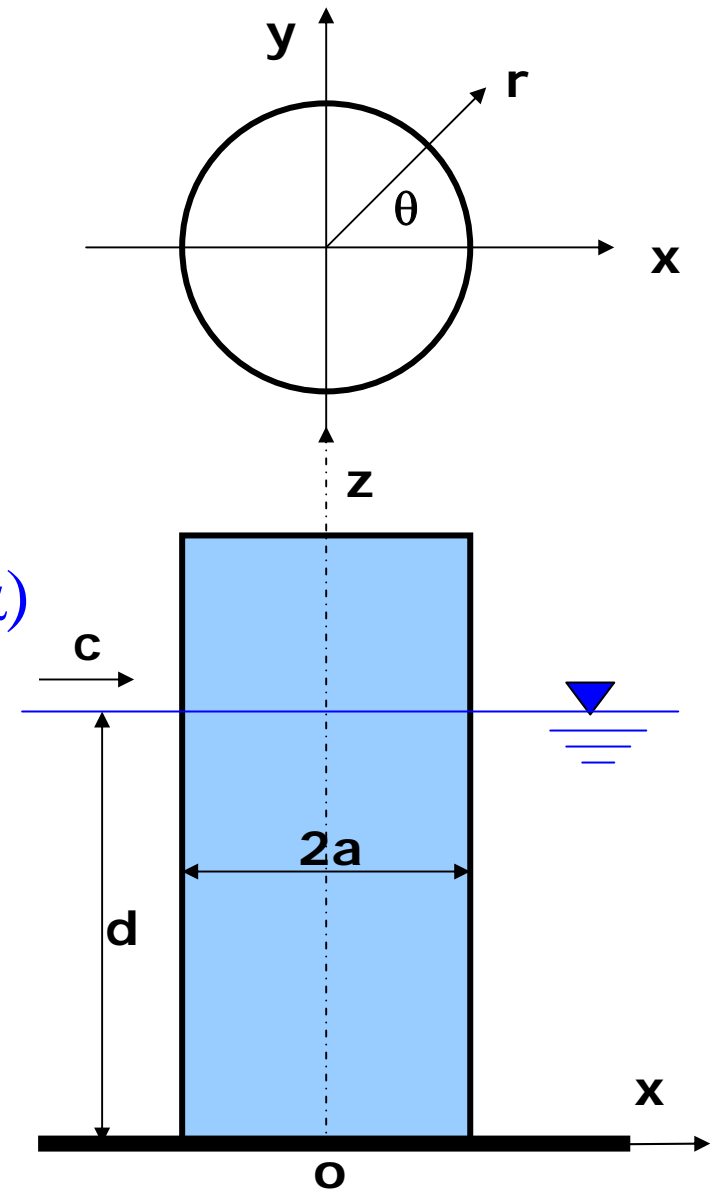


5.2.1 MacCamy-Fuchs公式

❖ 任意高度 z 处顺波向的水平波力

$$f_{Hy} = -\int_0^{2\pi} p_a \sin \theta a d\theta = 0$$

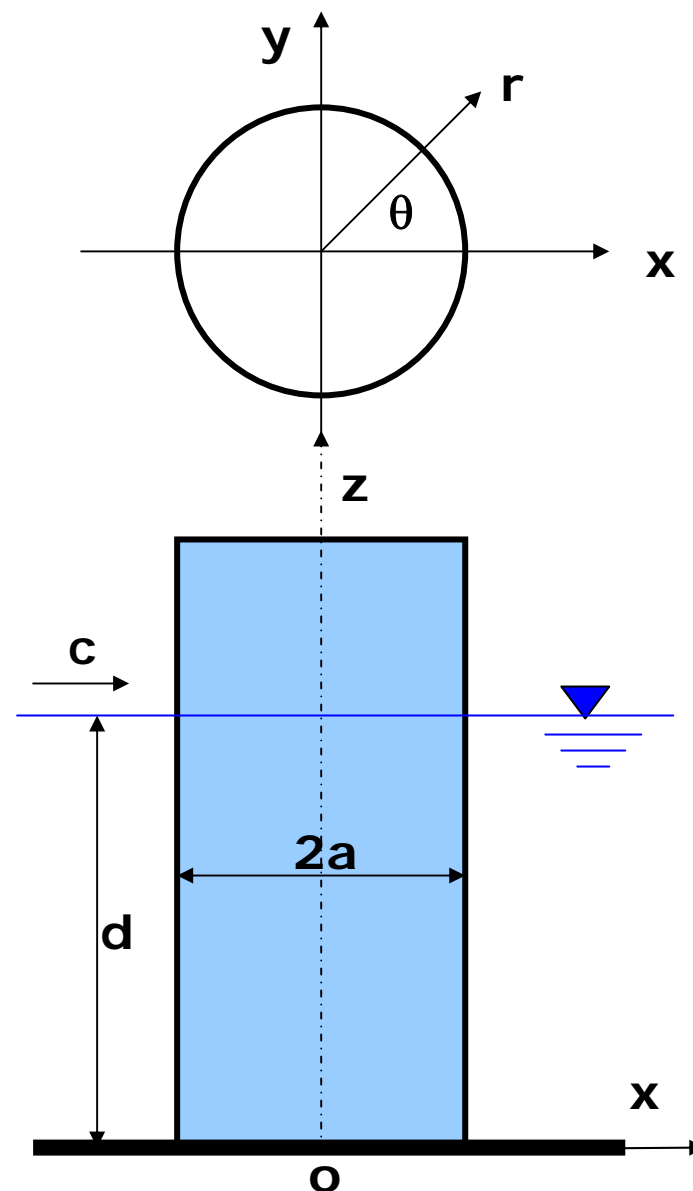
$$\begin{aligned} f_{Hx} &= -\int_0^{2\pi} p_a \cos \theta a d\theta \\ &= -\frac{2\rho g H}{k} \frac{ch k z}{ch k d} A(ka) \sin(\omega t - \alpha) \end{aligned}$$



5.2.1 MacCamy-Fuchs公式

❖ 任意高度 z 处顺波向的水平波力

$$\begin{aligned}
 f_{Hx} &= -\int_0^{2\pi} p_a \cos \theta a d\theta \\
 &= C_M \rho \frac{\pi D^2}{4} \frac{\partial u_x}{\partial t} \\
 &= -\frac{1}{8} C_M \rho g \pi H k D^2 \frac{c h k z}{c h k d} \sin \omega t \\
 C_M &= \frac{4A(ka)}{\pi(ka)^2}
 \end{aligned}$$

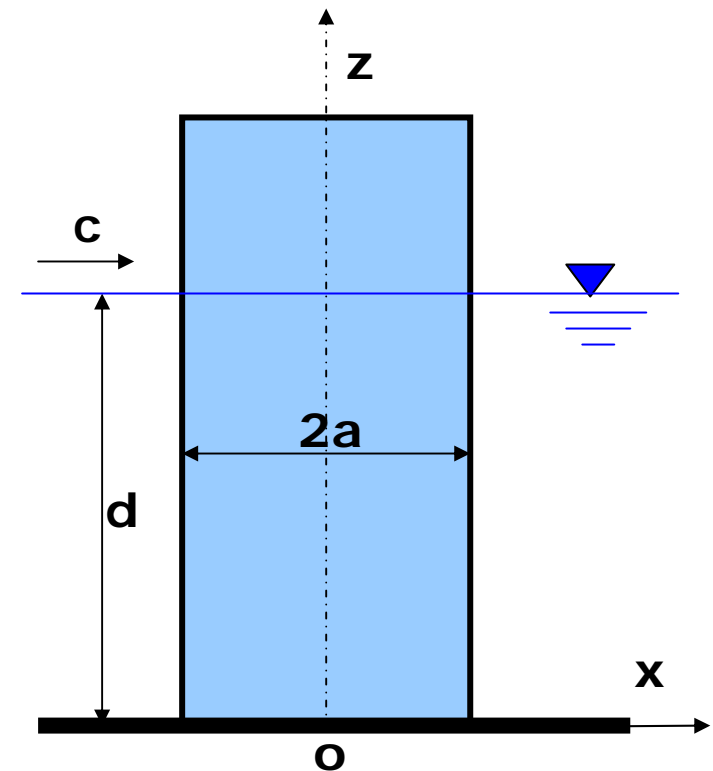


5.2.1 MacCamy-Fuchs公式

❖ 总水平波力

$$F_H = \int_0^d f_H dz = - \int_0^d \frac{2\rho g H}{k} \frac{ch kz}{ch kd} A(ka) \sin(\omega t - \alpha) dz$$

$$= 2\rho g H \operatorname{th} kd A(ka) \sin(\omega t - \alpha)$$



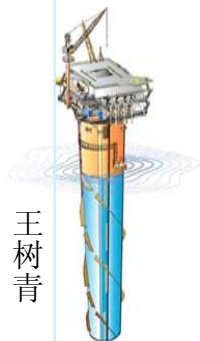
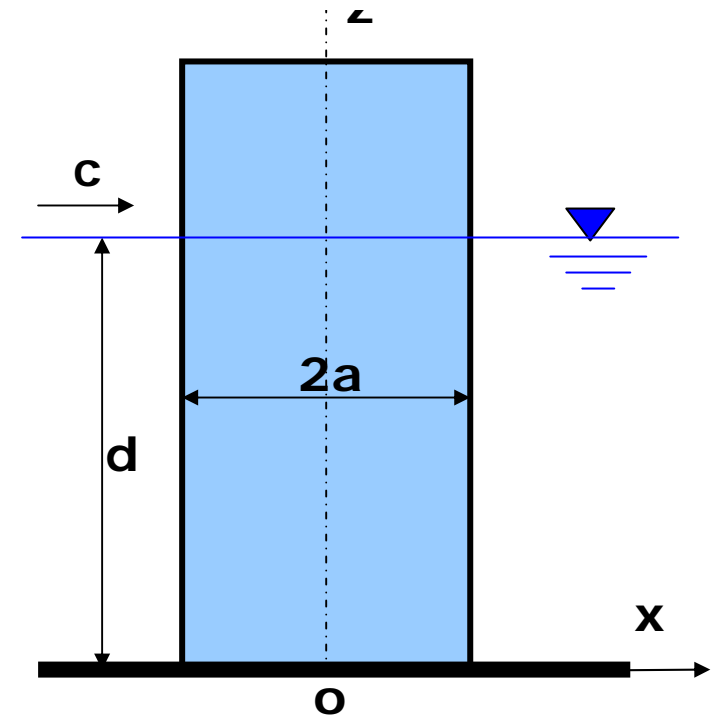
5.2.1 MacCamy-Fuchs公式

❖ 总水平波力矩

$$M_H = \int_0^d z f_H dz$$

$$= \frac{2\rho g H}{k^3} \frac{A(ka)}{\operatorname{ch} kd} [kd \operatorname{sh} kd - \operatorname{ch} kd + 1] \sin(\omega t - \alpha)$$

$$e = \frac{M_H}{F_H} = \frac{1}{k} \left[\frac{kd \operatorname{sh} kd - \operatorname{ch} kd + 1}{\operatorname{sh} kd} \right]$$



5.2.2 大直径直立圆柱上的非线性波浪力

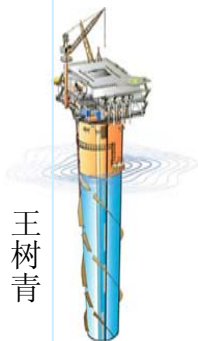
❖ STOKES五阶波速度势

$$\frac{k\Phi}{c} = \sum_{n=1}^5 \lambda_n \operatorname{ch} nk(z+d) \sin n(kx - \omega t)$$

$$\Phi_I = \sum_{n=1}^5 \Phi_{In} = \sum_{n=1}^5 -i\lambda_n \operatorname{ch} nkz) e^{in(kx - \omega t)}$$

$$\Phi_I = \sum_{n=1}^5 -i\lambda_n \operatorname{ch} nkz \left[\sum_{m=0}^{\infty} \beta_m J_m(nkr) \cos(m\theta) \right] e^{-in\omega t}$$

$$\Phi_S = \sum_{n=1}^5 -i\lambda_n \operatorname{ch} nkz \left[\sum_{m=0}^{\infty} \beta_m B_{mn} H_m(nkr) \cos(m\theta) \right] e^{-in\omega t}$$



5.2.2 大直径直立圆柱上的非线性波浪力

❖ 总速度势

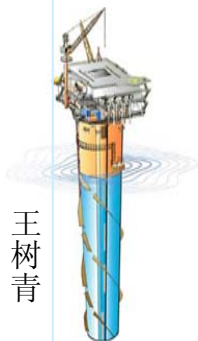
$$\Phi_I = \sum_{n=1}^5 -i\lambda_n c h n k z \left[\sum_{m=0}^{\infty} \beta_m J_m(nkr) \cos(m\theta) \right] e^{-in\omega t}$$

$$\Phi_S = \sum_{n=1}^5 -i\gamma_n c h n k z \left[\sum_{m=0}^{\infty} \beta_m B_{mn} H_m(nkr) \cos(m\theta) \right] e^{-in\omega t}$$

$$\begin{aligned} \Phi = \Phi_I + \Phi_S = & \sum_{n=1}^5 -i\lambda_n c h n k z \left[\sum_{m=0}^{\infty} \beta_m J_m(nkr) \cos(m\theta) \right. \\ & \left. + \sum_{m=0}^{\infty} \beta_m B_{mn} H_m(nkr) \cos(m\theta) \right] e^{-in\omega t} \end{aligned}$$

- 确定系数 B_{mn} ——柱面边界条件

$$U_r|_{r=a} = \frac{\partial \Phi}{\partial r} \bigg|_{r=a} = \left(\frac{\partial \Phi_I}{\partial r} + \frac{\partial \Phi_S}{\partial r} \right) \bigg|_{r=a} = 0 \quad \longrightarrow \quad B_{mn} = -\frac{J'_m(nka)}{H'_m(nka)}$$

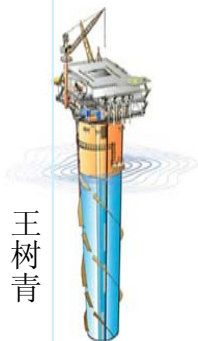


5.2.2 大直径直立圆柱上的非线性波浪力

❖ 总速度势

$$\Phi = \Phi_I + \Phi_S = \sum_{n=1}^5 -i\lambda_n c h n k z \left[\sum_{m=0}^{\infty} \beta_m J_m(nkr) \cos(m\theta) + \sum_{m=0}^{\infty} \beta_m B_{mn} H_m(nkr) \cos(m\theta) \right] e^{-in\omega t}$$

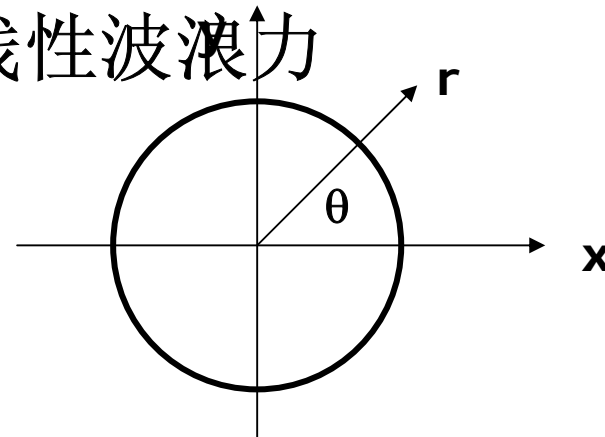
$$\Phi = \sum_{n=1}^5 -i\lambda_n c h n k z \left\{ \sum_{m=0}^{\infty} \beta_m \left[J_m(nka) - \frac{J'_m(nka)}{H'_m(nka)} H_m(nkr) \right] \cos(m\theta) \right\} e^{-in\omega t}$$



5.2.2 大直径直立圆柱上的非线性波浪力

❖ 柱面压强

$$p = -\rho \left. \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right|_{r=a}$$



$$p_a = \sum_{n=1}^5 n\omega\rho\lambda_n chn k z \left\{ \sum_{m=0}^{\infty} \beta_m \left[J_m(nka) - \frac{J'_m(nka)}{H'_m(nka)} H_m(nkr) \right] \cos(m\theta) \right\} e^{-in\omega t}$$

$$\Phi = \sum_{n=1}^5 -i\lambda_n chn k z \left\{ \sum_{m=0}^{\infty} \beta_m \left[J_m(nka) - \frac{J'_m(nka)}{H'_m(nka)} H_m(nkr) \right] \cos(m\theta) \right\} e^{-in\omega t}$$

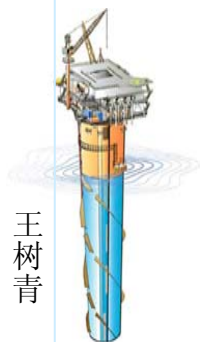
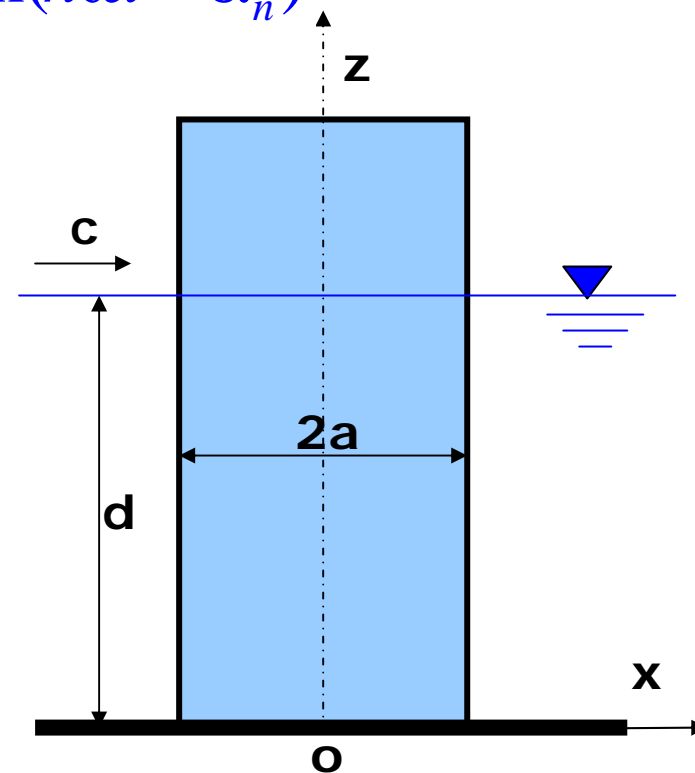


5.2.2 大直径直立圆柱上的非线性波浪力

❖ 总水平波力

$$F_H = \int_0^d f_H dz$$

$$= -\frac{4\omega\rho}{k} \sum_{n=1}^5 \lambda_n \operatorname{ch} nkz A(nka) \sin(n\omega t - \alpha_n)$$

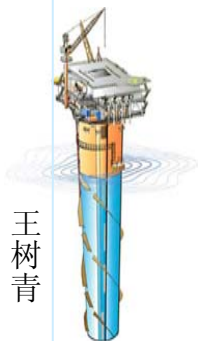


○ 5.3 任意形状大尺度结构物上的波浪力

❖ 三维源分布法基本思路

$$\Phi(x, y, z, t) = \Phi_I(x, y, z, t) + \Phi_s(x, y, z, t)$$

$$\begin{aligned}\Phi(x, y, z, t) &= \phi(x, y, z)e^{-i\omega t} \\ &= [\phi_I(x, y, z) + \phi_s(x, y, z)]e^{-i\omega t}\end{aligned}$$



○ 5.3.1 三维源分布法

(1) 认为结构物湿润表面 $S(x, y, z) = 0$ 上的各点都为波源;

(2) 设表面 S 上某点 M 为具有单位强度的点波源, 则它对波动场中某点 Q 所引起的扰动势 (源势) 为 $G(\xi, \eta, \zeta; x, y, z)$;

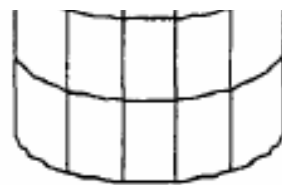
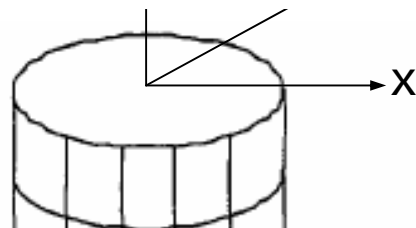
(3) 若 M 点的源强为 $f(\xi, \eta, \zeta)$, 则其对 Q 点所引起的扰动势 (源势) 为 $f(\xi, \eta, \zeta) G(\xi, \eta, \zeta; x, y, z)$;

(4) 整个结构物 (湿润表面) 对 Q 点所引起的源势为

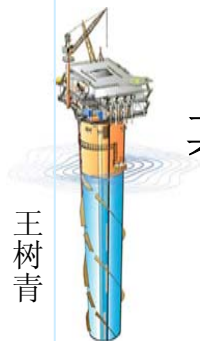
$$\phi_s(x, y, z) = \frac{1}{4\pi} \iint_s f(\xi, \eta, \zeta) G(\xi, \eta, \zeta; x, y, z) ds \quad \left. \begin{array}{l} \text{表面} \\ z=0 \end{array} \right\}$$

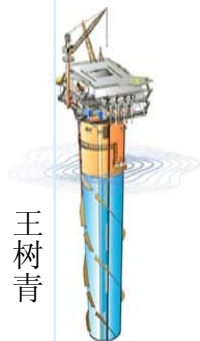
其中: $f(\xi, \eta, \zeta)$ 为源强分布函数,

$G(\xi, \eta, \zeta; x, y, z)$ 为格林函数



• $Q(x, y, z)$





○ 5.3.1 三维源分布法

❖ 格林函数 $G(\xi, \eta, \zeta; x, y, z)$

a. 拉普拉斯方程: $\nabla^2 G = 0$

b. 自由水面 $z=0$: $\frac{\partial G}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g} G = 0$

c. 水底条件 $z = -d$ $\frac{\partial G}{\partial z} = 0$

d. 无穷远处 $\lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{r} \left(\frac{\partial G}{\partial r} - ikG \right) = 0$

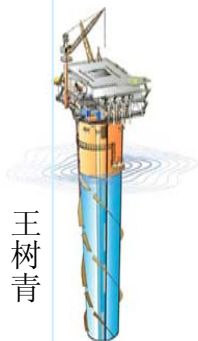
○ 5.3.1 三维源分布法

$$\phi_s(x, y, z) = \frac{1}{4\pi} \iint_s f(\xi, \eta, \zeta) G(\xi, \eta, \zeta; x, y, z) ds$$

❖ 源强度分布函数 $f(\xi, \eta, \zeta)$

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial n} \right|_s = \left(\frac{\partial \Phi_I}{\partial n} + \frac{\partial \Phi_s}{\partial n} \right) \bigg|_s = 0$$

$$-f(x, y, z) + \frac{1}{2\pi} \iint_s f(\xi, \eta, \zeta) \frac{\partial G(\xi, \eta, \zeta; x, y, z)}{\partial n} ds = -2 \frac{\partial \phi_s}{\partial n}$$



○ 5.3.1 三维源分布法

$$\phi_s(x, y, z) = \frac{1}{4\pi} \iint_s f(\xi, \eta, \zeta) G(\xi, \eta, \zeta; x, y, z) ds$$

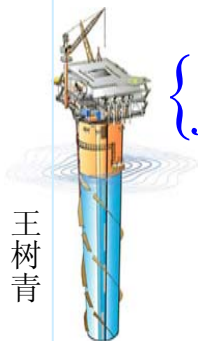
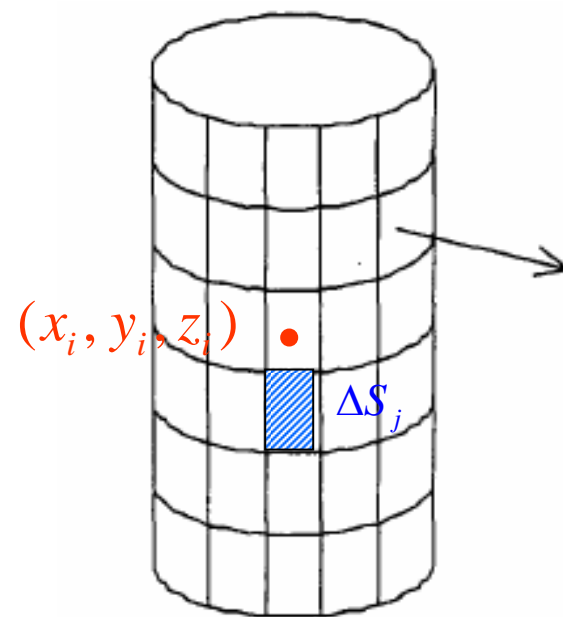
❖ 散射波速度势的数值计算

$$-f(x, y, z) + \frac{1}{2\pi} \iint_s f(\xi, \eta, \zeta) \frac{\partial G(\xi, \eta, \zeta; x, y, z)}{\partial n} ds = -2 \frac{\partial \phi_s}{\partial n}$$

$$-f_j(x_i, y_i, z_i) + \frac{1}{2\pi} \iint_s f_j(\xi_j, \eta_j, \zeta_j) \frac{\partial G(\xi_j, \eta_j, \zeta_j; x_i, y_i, z_i)}{\partial n} ds = 2U_{ni}(x_i, y_i, z_i)$$

$$-f_j + \sum_{j=1}^N a_{ij} f_j = 2U_{nj}$$

$$\{f\} = 2(a - I)^{-1} \{b\}$$

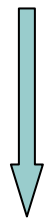


○ 5.3.1 三维源分布法

$$\phi_s(x, y, z) = \frac{1}{4\pi} \iint_s f(\xi, \eta, \zeta) G(\xi, \eta, \zeta; x, y, z) ds$$

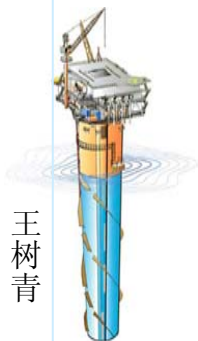
❖ 散射波速度势的数值计算

$$\phi_{sj} = \sum_{j=1}^N \beta_{ij} f_j$$



$$\beta_{ij} = \frac{1}{4\pi} \iint_{\Delta s_j} G(\xi_j, \eta_j, \zeta_j; x_i, y_i, z_i) ds$$

$$\{\phi_s\} = [\beta] \{f\}$$



○ 5.3.1 三维源分布法

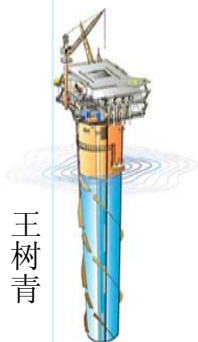
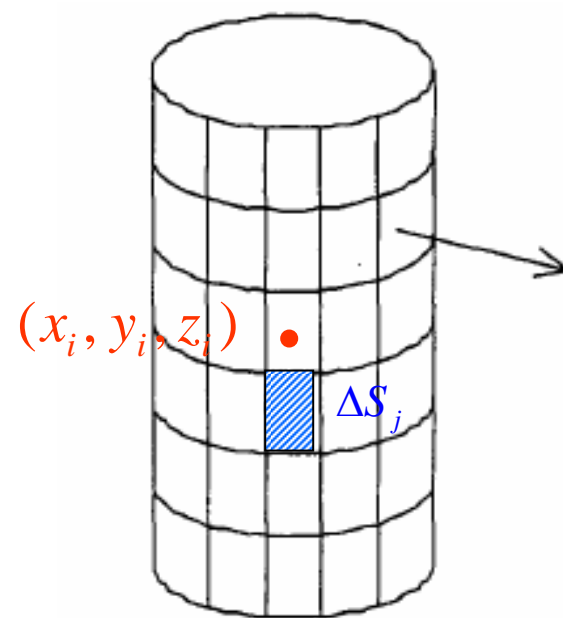
$$\phi_s(x, y, z) = \frac{1}{4\pi} \iint_s f(\xi, \eta, \zeta) G(\xi, \eta, \zeta; x, y, z) ds$$

$$\{f\} = 2(a - I)^{-1} \{b\}$$

$$\{\phi_s\} = [\beta] \{f\}$$

❖ 数值计算程序

- (1) 划分N个单元（单元面积，形心坐标，外法线）
- (2) 计算矩阵 $[\alpha]$ 、 $[\beta]$ 和列矢量 $\{b\}$;
- (3) 求源强度 f ，然后求散射速度势 ϕ_s ;
- (4) 计算每个单元形心处波压强 p ;
- (5) 求波浪力 F 和力矩 M 。

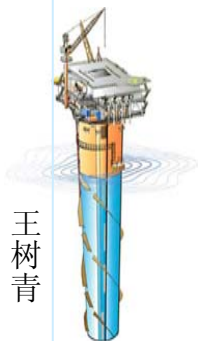


○ 5.3.1 三维源分布法

$$\phi_s(x, y, z) = \frac{1}{4\pi} \iint_s f(\xi, \eta, \zeta) G(\xi, \eta, \zeta; x, y, z) ds$$

❖ 对若干问题的讨论

- (1) 上部支撑与下部基础的相互影响
- (2) 单元个数N的选取
- (3) 格林函数的适用范围
- (4) 非线性效应



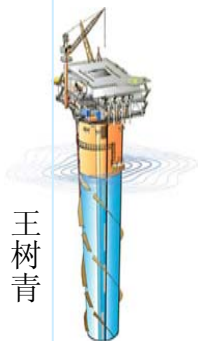
○ 5.3.1 三维源分布法

$$\phi_s(x, y, z) = \frac{1}{4\pi} \iint_s f(\xi, \eta, \zeta) G(\xi, \eta, \zeta; x, y, z) ds$$

❖ 理论计算结果与实验结果的比较

(1) 图5.16——圆柱和方柱

(2) 图5.19——CONDEEP平台比较



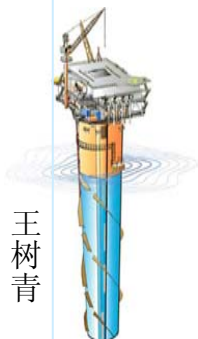
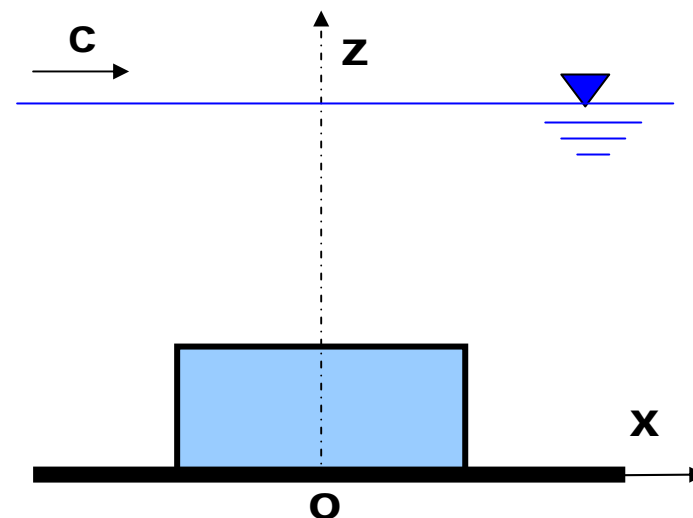
○ 5.4 大尺度潜体上的波浪力

○ 5.4.1 Froude-Krylov假定法

$$F = CF_K$$

- **C**——绕射系数，反映附加质量效应和绕射效应；
- **F_K**——未扰动入射波波压强对结构产生的**Froude-Krylov**力
(简称**F-K**力)

$$F_K = \rho V \left(\frac{du}{dt} \right)_a$$

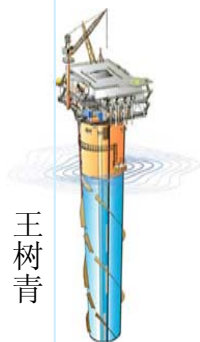
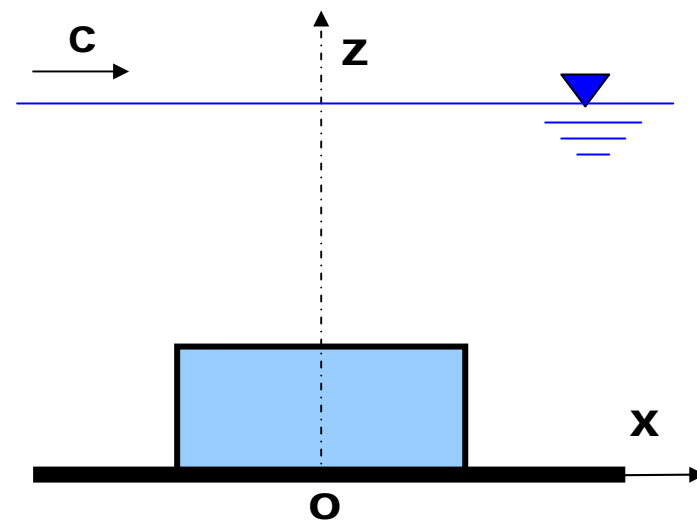


○ 5.4.1 Froude-Krylov假定法

$$F_H = C_H \iint_S p_x ds$$

$$F_V = C_V \iint_S p_z ds$$

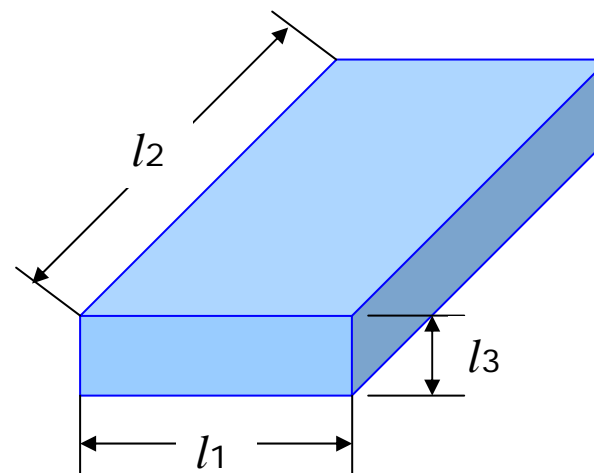
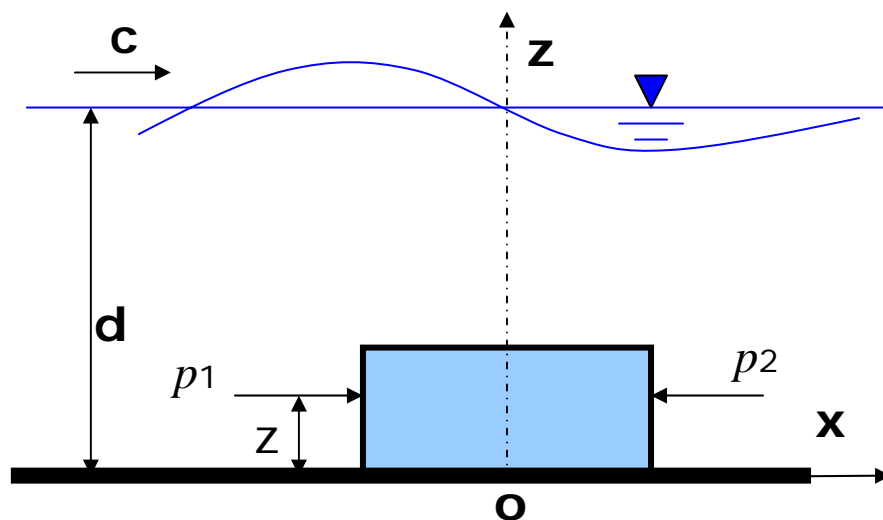
$$p = \frac{\gamma H}{2} \frac{\operatorname{ch} kz}{\operatorname{ch} kd} \cos(kx - \omega t)$$



○ 5.4.2 方形潜体上的波浪力

$$p = \frac{\gamma H}{2} \frac{\operatorname{ch} kz}{\operatorname{ch} kd} \cos(kx - \omega t)$$

$$\begin{aligned} F_H &= C_H \iint_S p_x ds = C_H l_2 \left[\int_0^{l_3} p_1 dz - \int_0^{l_3} p_2 dz \right] \\ &= C_H \frac{\gamma H l_2}{2K} \frac{\operatorname{sh} kl_3}{\operatorname{ch} kd} [\cos(kx_1 - \omega t) - \cos(kx_2 - \omega t)] \\ &= -C_H \frac{\gamma H l_2}{k} \frac{\operatorname{sh} kl_3}{\operatorname{ch} kd} \sin \frac{1}{2} kl_1 \sin \omega t \end{aligned}$$

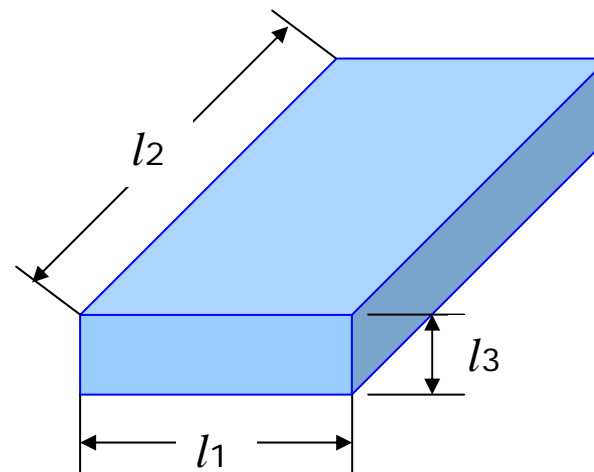
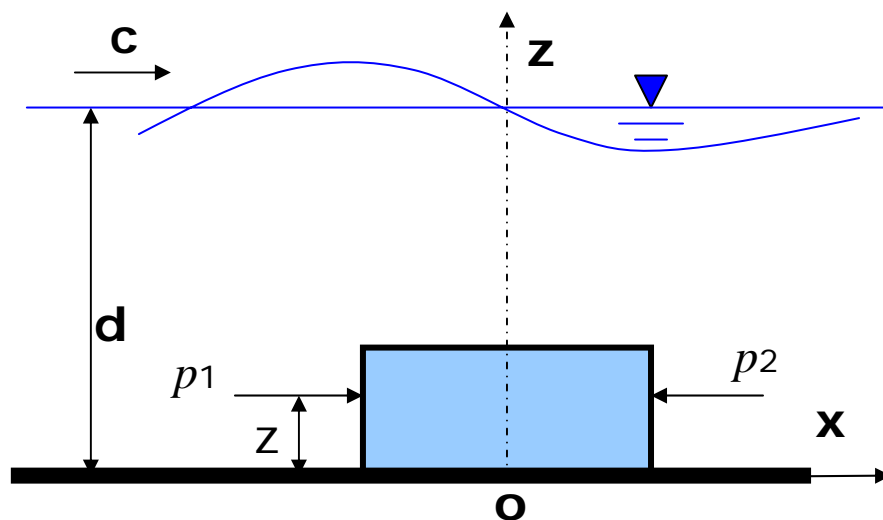


○ 5.4.2 方形潜体上的波浪力

$$p = \frac{\gamma H}{2} \frac{\operatorname{ch} kz}{\operatorname{ch} kd} \cos(kx - \omega t)$$

$$M_H = C_H l_2 \left[\int_0^{l_3} p_1 z dz - \int_0^{l_3} p_2 z dz \right]$$

$$= -C_H \frac{\gamma H l_2}{k} \frac{\operatorname{sh} kl_3}{\operatorname{ch} kd} \left(l_3 - \frac{\operatorname{ch} kl_3 - 1}{k \operatorname{sh} kl_3} \right) \sin \frac{1}{2} kl_1 \sin \omega t$$



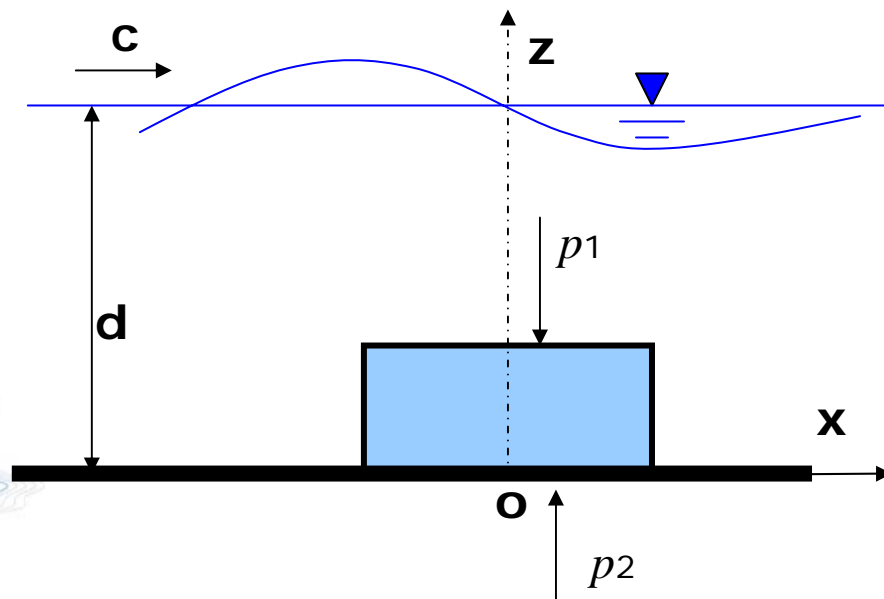
○ 5.4.2 方形潜体上的波浪力

$$p = \frac{\gamma H}{2} \frac{\operatorname{ch} kz}{\operatorname{ch} kd} \cos(kx - \omega t)$$

❖ (1) 潜体座落在透水层上

$$F_V = C_V \iint_S p_z ds = -C_V l_2 \left[\int_{-l_1/2}^{l_1/2} p_1 dx - \int_{-l_1/2}^{l_1/2} p_2 dx \right]$$

$$= -C_V \frac{\gamma H l_2}{k} \frac{\operatorname{ch} kl_3 - 1}{\operatorname{ch} kd} \sin \frac{1}{2} kl_1 \cos \omega t$$



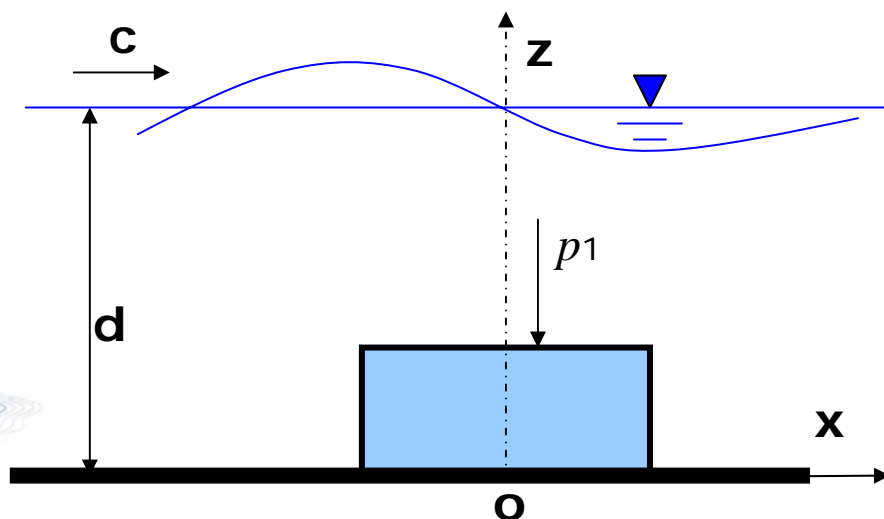
○ 5.4.2 方形潜体上的波浪力

$$p = \frac{\gamma H}{2} \frac{\operatorname{ch} kz}{\operatorname{ch} kd} \cos(kx - \omega t)$$

❖ (2) 潜体座落在不透水层上

$$F_V = C_V \iint_S p_z ds = -C_V l_2 \int_{-l_1/2}^{l_1/2} p_1 dx$$

$$= -C_V \frac{\gamma H l_2}{k} \frac{\operatorname{ch} kl_3}{\operatorname{ch} kd} \sin \frac{1}{2} kl_1 \cos \omega t$$



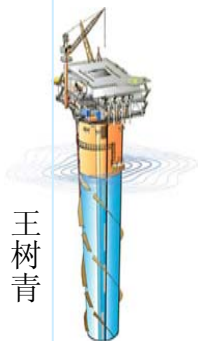
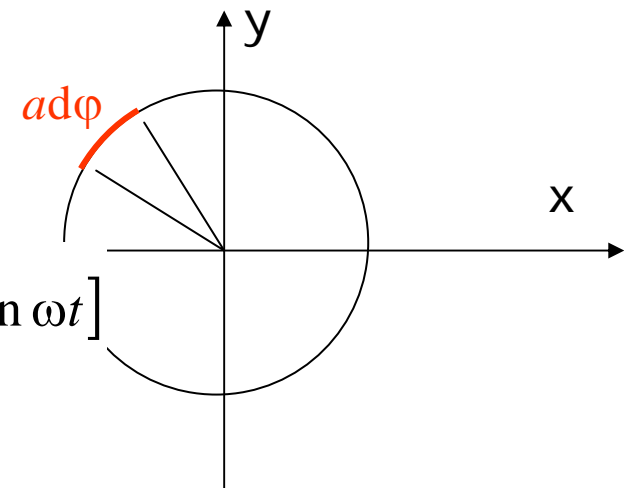
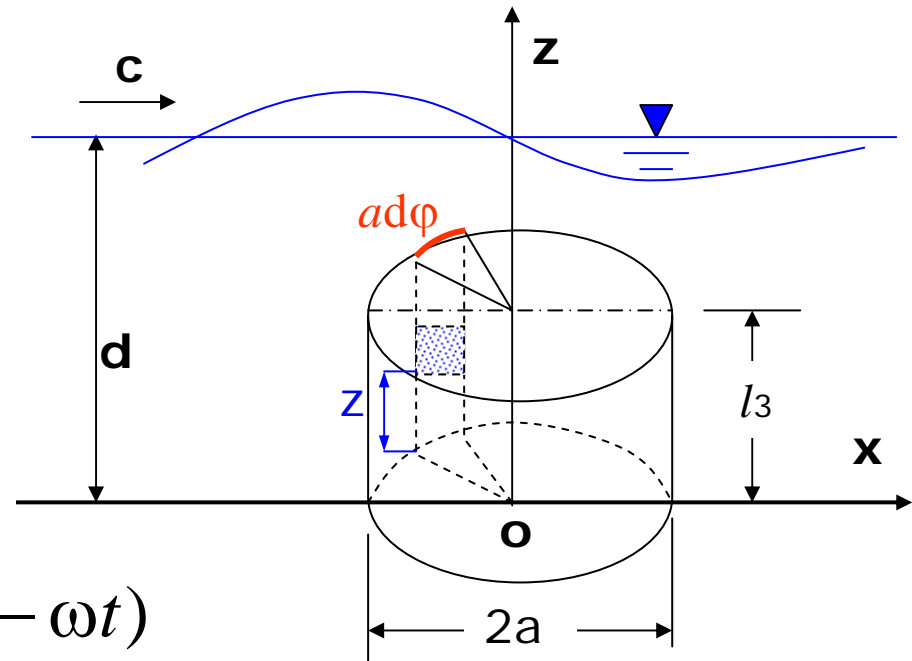
5.4.3 大尺度圆柱体上的波浪力

$$p = \frac{\gamma H}{2} \frac{\operatorname{ch} kz}{\operatorname{ch} kd} \cos(kx - \omega t)$$

$$p = \frac{\gamma H}{2} \frac{\operatorname{ch} kz}{\operatorname{ch} kd} \cos(ka \cos \theta - \omega t)$$

$$= \frac{\gamma H}{2} \frac{\operatorname{ch} kz}{\operatorname{ch} kd} \cos(ka \sin \varphi - \omega t)$$

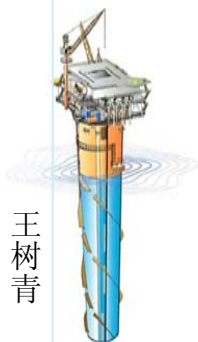
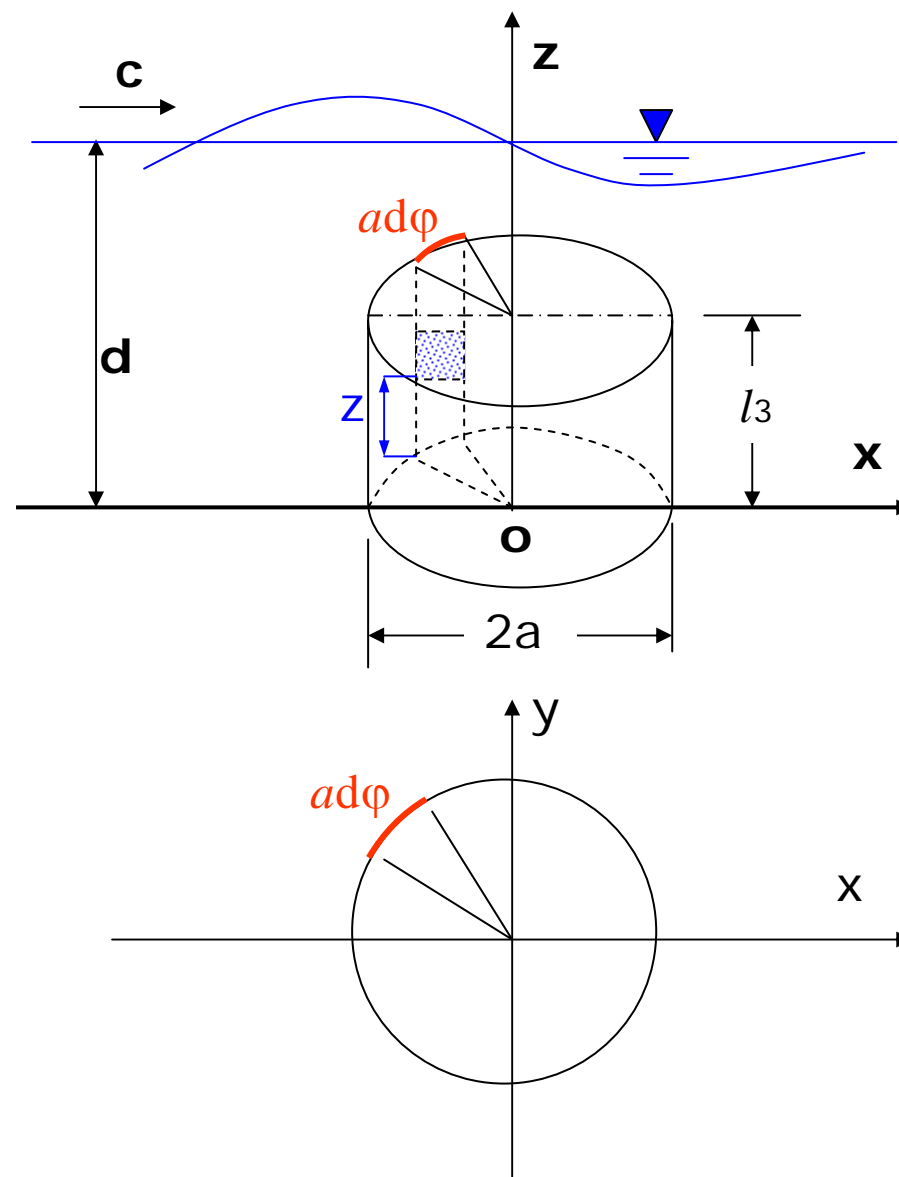
$$= \frac{\gamma H}{2} \frac{\operatorname{ch} kz}{\operatorname{ch} kd} [\cos(ka \sin \varphi) \cos \omega t - \sin(ka \sin \varphi) \sin \omega t]$$



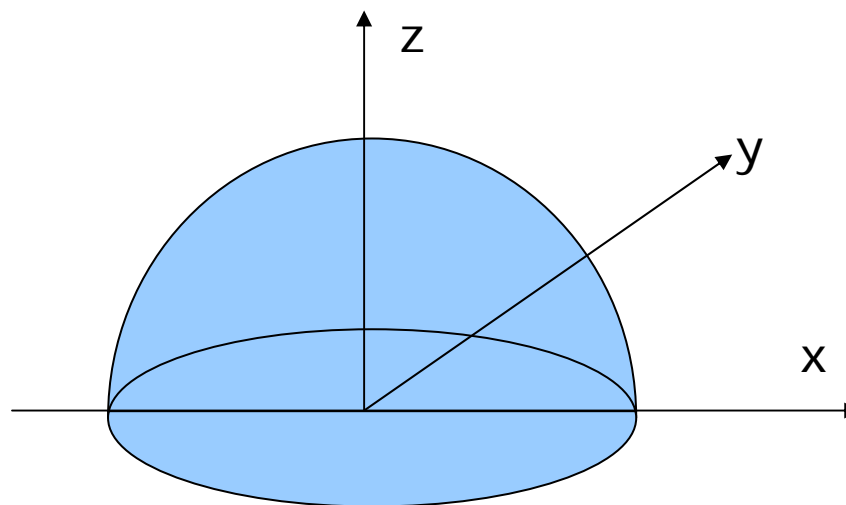
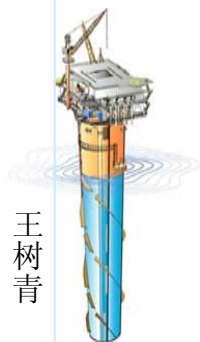
○ 5.4.3 大尺度圆柱体上的波浪力

$$F_H = C_H \iint_S p_x ds$$

$$M_H = C_H \iint_S p_x z ds$$



○ 5.4.4 大尺度半球潜体上的波浪力



○ 5.4.5 算例

